

200938003B

厚生労働科学研究費補助金
労働安全衛生総合研究事業

基礎工事用大型建設機械の転倒防止に関する研究

(H19 - 労働 - 一般 - 005)

平成 19 年度～21 年度 総合研究報告書

研究代表者 玉手 聡

平成 22(2010)年 4 月

厚生労働科学研究費補助金
労働安全衛生総合研究事業

基礎工事用大型建設機械の転倒防止に関する研究

(H19 - 労働 - 一般 - 005)

平成 19 年度～21 年度 総合研究報告書

研究代表者 玉手 聡

平成 22(2010)年 4 月

基礎工事用大型建設機械の転倒防止に関する研究

目次	ページ
第1章 序論	1
1.1 はじめに	1
1.2 研究の構成	3
第2章 事例研究	5
2.1 災害事例1	5
2.2 災害事例2	18
2.3 参考文献	35
第3章 転倒防止に関する安全基準の国際比較	37
3.1 日本における安全基準	37
3.2 海外における安全基準	46
3.3 安全基準の国際比較と要点	69
3.4 まとめ	71
3.5 参考文献	73
第4章 実大現場実験	75
4.1 実験の概要	75
4.2 現場密度試験	77
4.3 水準測量	84
4.4 平板載荷試験	89
4.5 自走実験の実施と挙動計測	96
4.6 くい打機械の安定度	104
4.7 自走時応答の実験的解析	112
4.8 まとめ	147
4.9 参考文献	149

第5章	くい打機のモデル化と実験装置の開発	151
5.1	小型くい打機模型の作製	151
5.2	くい打機模型の改良	160
5.3	その他の実験装置	175
5.4	模型地盤の条件と調査	196
5.5	実験条件	211
5.6	参考文献	222
第6章	遠心場走行実験	223
6.1	収録データの基本的な解析方法	223
6.2	関東ロームの模型地盤における起伏の指標化	226
6.3	履帯に作用する理論接地圧	231
6.4	均質平坦地盤 ($F_s=1.5$) の実験結果	234
6.5	均質平坦地盤 ($F_s=0.8$) の実験結果	236
6.6	平坦均質な関東ローム地盤での実験結果	238
6.7	関東ロームの起伏地盤での実験結果	242
6.8	まとめ	247
6.9	参考文献	248
第7章	履帯基礎の支持力と敷鉄板の養生性能	249
7.1	概要	249
7.2	履帯基礎の支持力に与える重心の影響	250
7.3	敷鉄板による移動荷重の分散効果	258
7.4	重ね敷き方法の分類と養生性能	270
7.5	まとめ	276
7.6	参考文献	278
第8章	不安定要因とその影響	279
8.1	機械側条件による影響	279
8.2	地盤側条件による影響	294

8.3	支持地盤の破壊に対する安全性	299
8.4	転倒に対する安全性	306
8.5	まとめ	318
8.6	参考文献	321
第9章 Code of practice の提案		323
第10章 まとめ		327
10.1	概説	327
10.2	第1章の要約	327
10.3	第2章の要約	327
10.4	第3章の要約	328
10.5	第4章の要約	329
10.6	第5章の要約	329
10.7	第6章の要約	330
10.8	第7章の要約	330
10.9	第8章の要約	330
10.10	第9章の要約	332
10.11	健康危険情報	333
10.12	研究成果による特許権等の知的財産権の出願・登録状況	333
第11章 謝辞		335
第12章 研究成果の刊行に関する一覧		337
【参考】研究成果の刊行物・別刷り		341

第1章 序論

1.1 はじめに

本研究の目的は基礎工事中大型建設機械の転倒防止に資する情報を提供することである。この基礎工事中大型機械とは、労働安全衛生法施行令第10条第2項に規定される建設機械を想定しており、別表第7第3項に記載された基礎工事中機械のうち大型のものを意味している。すなわち、くい打機、くい抜機、アース・ドリル、リバース・サーキュレーション・ドリル、せん孔機、アース・オーガ、ペーパー・ドレーン・マシーン等である。これらの機械はベースマシーンが類似しており、その安定特性はほぼ同等と見なされる。本研究では、特にことわらない限りこれらの機械をまとめて「くい打機」と呼ぶ。

くい打機の転倒原因には設置地盤の支持力不足が多く見られる。その背景にはトップヘビーな構造を有する機械が現場内を自走することと、この機械が設置される施工現場が潜在的に軟弱な地盤であることの2つの不安定要因があると考えられる。本研究では施工現場を自走するくい打機の不安定化メカニズムを明らかにし、安定設置に必要な地盤の支持力要件を検討した。

くい打機は下部走行体と上部旋回体より構成される車両系建設機械である。この機械は地盤改良工事や基礎工事に用いられるものである。従って、元々強固ではない地盤を改善する工事に用いられ、潜在的に不安定な地盤での作業を余儀なくされる。過去に発生した転倒災害を調査すると、自走中の転倒が多く見られる。転倒状況を詳細に分析すると、掘削や埋め戻された現場内をトップヘビーな状態で自走していた時に発生していたことが明らかになった。転倒防止には施工現場の地盤養生が不可欠である。対策方法は比較的シンプルで容易なものである。従って、対策の実施により確実に転倒は防止されるものである。

転倒は地盤養生が不確実であったために発生したものがほとんどであるが、その背景にはその他の危険要因が重なって転倒していたことがわかった。すなわち、地盤養生に本来備わるべき安全の余裕が少なかったために、偶発したその他の危険を受容することができずに限界を超えたものであった。地盤養生には、表層のセメント安定処理と敷鉄板の敷設が一般的であり、通常はある程度余裕を持った支持力が得られる。しかし、災害に見られた不十分な地盤養生が行われた背景には、設置地盤の支持力に対する過信や判断の誤りがあった。また、くい打機の安定性に対する過信も見られた。従って、くい打機の使用には様々な危険が潜在していることを理解したうえで、施工現場の地盤養生は適切な安全の余裕をもって実施されることが必要である。

この安全の余裕がどの程度必要なのかを定量的な議論をするためには、危険となる要因を詳細に分析する必要がある。くい打機の転倒危険に関する問題では、「どのような要因」が機体を不安定化させるのか、そして、その要因は「どのくらい」不安定化させるものな

のかを明らかにする必要がある。従って、くい打機の転倒に与える危険要因を解明することにより、安全の余裕と危険性の関係を明らかにでき、防止対策の選択を可能にする。

都市部の開発では地盤改良が行われ、大型建設工事では基礎工事が不可欠である。そのため、くい打機の使用は近年増加しており、その転倒防止措置の検討は急務な問題となっている。同種災害の発生を防止するためには、走行時におけるくい打機の不安定性を考慮して安定度の閾値を再検討し、安定設置に必要な地盤の支持力条件を明らかにする必要がある。本研究は以下の4名の研究者によって実施された。

研究代表者 玉手 聡 (独立行政法人 労働安全衛生総合研究所)

研究分担者 末政直晃 (東京都市大学)

研究分担者 伊藤和也 (独立行政法人 労働安全衛生総合研究所)

リサーチアシスタント 堀 智仁 (独立行政法人 労働安全衛生総合研究所)

1.2 研究の構成

本研究は大きく以下の6つの内容で構成される。

(1) 災害事例の調査

過去に発生した災害事例を調査し、くい打機が有する安全上の問題点と解明が必要とされる事項を検討した。抽出した事例では、下部走行体の履帯が沈下したことにより発生したくい打機の転倒災害について、その発生状況を整理した。機体の緒元や作業状態ならびに地盤条件等の危険要因を分析し、くい打機を使用する作業に潜在する危険性を考察した。

(2) 安全基準の国際比較

労働安全衛生規則(厚生労働省令)ではくい打機の転倒を防止するために、設置地盤には沈下防止対策を講じなければならないことを述べており、安定設置の必要性を定性的に述べている。車両系建設機械構造規格(厚生労働省告示)では、設置地盤が水平かつ堅固であることを前提として、機体の安定度の最低基準を定めている。国内の学協会では設定すべき安定度の推奨値を示しており、施工において与えるべき余裕が示されている。

欧州規格(European Norm)であり、EN規格とも呼ぶ)は、くい打機等に関する転倒防止について基準を示し、使用状況に応じた安定度が分類して示されている。安全基準に関する国内外の比較を示し、実施上の規範(Code of practice)を検討する上で解明が必要な研究項目を整理した。

(3) 現場実大実験による自走挙動の計測

自走するくい打機の標準挙動を明らかにするために、現場実大実験による計測を行った。この計測は東京国際空港国際線地区エプロン等整備等事業が行われていたエリアの南西部において実施したものであり、この施工にあたる事業者の協力により実現したものである。使用されたくい打機は機体重量が100トンを超える大型のサンドコンパクション用機械であった。実大くい打機の自走挙動を示し、後述する模型実験において参照する標準挙動が得られた。

(4) 遠心場走行実験による転倒危険要因の解明

くい打機を約1/30スケールに縮小した小型走行模型を開発して遠心場走行実験を行った。その理由は、転倒に与える機械側と支持地盤側の危険要因を解明するために、パラメータを変化させた再現実験を行うためである。小型模型の挙動を計測することによって、危険要因とそのレベルを直接的に解明することができる。

この模型は本研究において開発したものであり、30gの遠心力に耐えうる筐体と自走可能な動力が備わる。リーダー部に搭載するウェイトの質量と高さを変えることによって、任意な安定度と重心位置が再現できる。搭載した3成分の加速度計によって模型に生ずる揺

動を計測する。遠心模型実験では実機と同じ接地圧力レベルが再現可能であり、履帯を支持する全ての車軸と補助輪には圧力分布を明らかにするための荷重計が備わる。本実験では物理モデルを段階的に高度化させて、施工現場を自走するくい打機に潜在する危険の解明に取り組んだ。

(5) 履帯基礎の支持力と敷鉄板の養生性能に関する実験的解明

くい打機の下部走行体に備わる履帯の基礎模型を製作し、その載荷圧力と沈下比の関係を実験的に調査した。この調査では機体重心の違いを荷重の偏心により再現した。また、地盤養生に用いられる敷鉄板について、接地圧力の分散効果を実験的に調査した。くい打機は現場内を移動して施工する。従って、敷鉄板に対しては移動荷重となる。分散効果は載荷位置により異なると共に、重複の与え方によっても変わることを明らかにした。

(6) 機体の揺動と履帯接地圧力に与える安定度と支持力条件の影響

上記(4)の遠心場走行実験に基づいて、くい打機の挙動解析では、機械側条件と地盤側条件の両面から不安定要因を検討した。機械側条件では安定度と重心高さ、及び走行速度に着目した。地盤側条件では均質平坦地盤、不均質平坦地盤、不均質起伏地盤へと段階的に高度化させ、支持力安全率と変動係数の違い、及び起伏(傾斜角)が機体の揺動に与える影響を調査した。

危険要因に対する支持地盤の破壊に対する危険と、機体の転倒に対する危険を確率的な手法を用いて総合的に検討した。検討結果に基づいて、安定設置に必要な機体条件と、施工現場における地盤条件について、実施上の規範(Code of practice)を検討した。

以上のように、本報告では得られた研究成果に基づいて、転倒防止のために必要な機体と地盤の必要要件を報告するものである。

第2章 事例研究

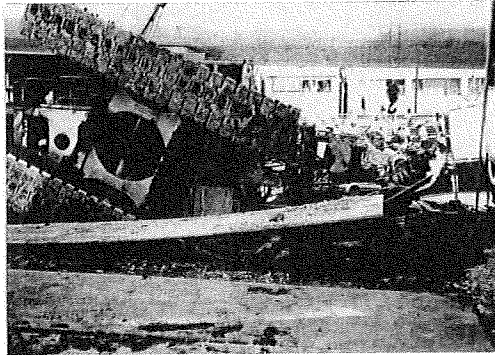
2.1 災害事例1

ビル建築工事現場において、写真 2-1-1 に示すくい打機の転倒災害が発生した。クローラ車の車軸付近には写真 2-1-2 のような大きな沈下が見られ、この機械は設置地盤が不安定であることが原因で転倒したことがわかる。この現場では地盤に安定処理が施されるとともに、敷鉄板が敷設されていた。しかしながら支持地盤には局所的な崩壊が生じ、機械は転倒した。

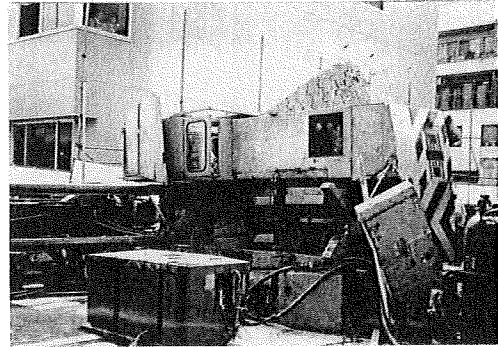
本報告では、本災害の資料調査に基づき、設置地盤の支持力と履帯接地圧の比較による安定性の検討を行い、次に転倒メカニズムを推察する。さらに、SMW 施工におけるくい打機の安定上の問題点を考察する。



写真 2-1-1 2002(平成 14)年に発生したくい打機の転倒



a) 車軸付近が地盤に沈下した様子



b) 横向きとなった上部旋回体

写真 2-1-2 転倒したくい打機の状況

2.1.1 災害発生までの過程

本転倒災害の発生までの過程は表 2-1-1 の通りであった。この災害では現場の作業員 2 名が重傷を負った。

表 2-1-1 転倒災害発生までの過程

経過	時刻	作業内容
4 日前		地盤改良工事の施工が開始された
前日		山留め重機搬入・組立作業
当日	8:00	朝礼
	9:00	くい打機組立(前日からの継続作業)とくい打機段取り(溝掘, 敷鉄板等)等の作
	10:00	バックホウによる溝掘り作業中に既存水道管を破損する
	10:03	水道局へ連絡する
	10:05	水中ポンプにて排水を行う
	10:45	水道局が到着する
	11:30	止水が完了する
	11:45	水道管復旧が完了し, 溝掘り作業及び養生鉄板(敷鉄板)の敷設作業再開する
	12:15	同作業が完了する
	13:00	杭打ち作業着手のため, くい打機が移動を開始する
	13:10	くい打機が転倒した

2.1.2 災害当日の状況

災害が発生した当日は午前 9 時より安全ミーティングが行われ、その後、作業が開始された。この日の作業では、始めにくい打機の組み立てが行われた。このくい打機は 3 軸のアースオーガであり、地中連続壁(ソイルミキシングウォール、以下 SMW と呼ぶ)を施工するためのものである。機械の組み立ては約 1 時間で終了した。

SMW の施工に先立って、打設予定位置の溝掘削作業が行われた。この溝は幅 1m、深さ 0.8m であり、長さは 7m である。この溝は探索堀とも呼ばれ、オーガによる地中掘削とこれに引き続いて実施するセメントと土の混合(これを削孔混練りと言う)をスムーズに行うために実施するものである。

図 2-1-1 は日本材料学会「ソイルミキシングウォール(SMW)設計施工指針(改訂版)」¹⁾に示された標準的な施工手順を示す。「溝掘り」は施工位置の精度及び品質を向上させるためと、施工位置における地中障害物の有無を調査するために実施されるものである。またこの探索堀した溝は、削孔混練時の発生泥土の処理溝としての機能も有する。最終的にはこの溝部分に頭つなぎ梁が設置され、一体化した SMW が構築される。

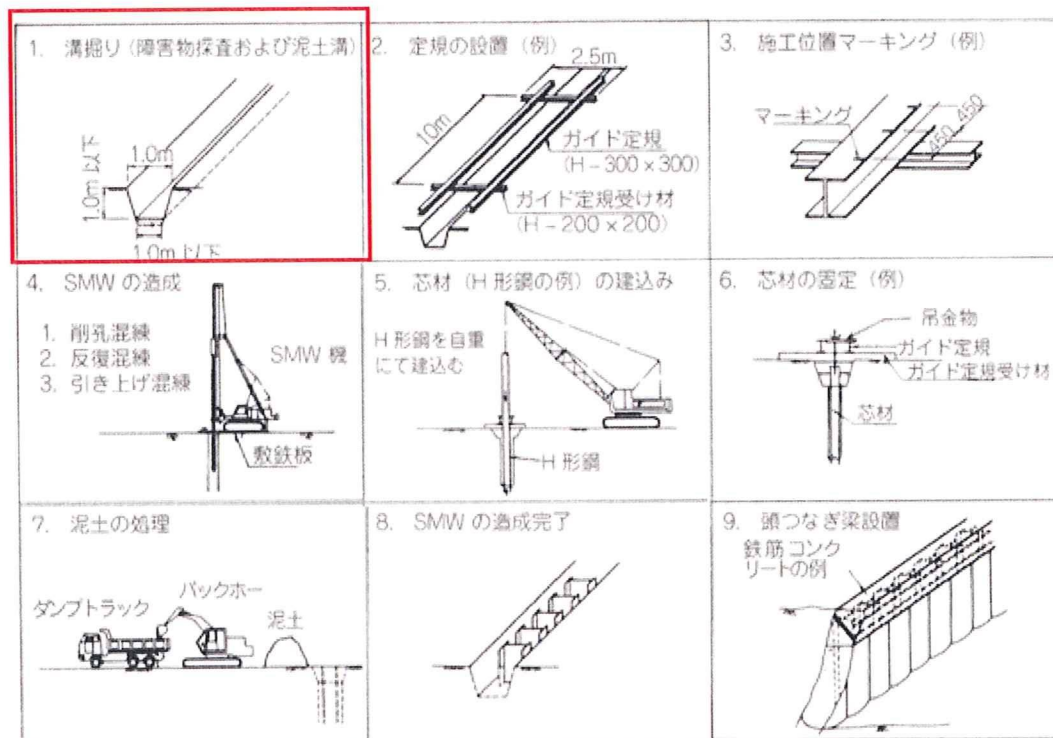


図 2-1-1 SMW の施工手順書

(日本材料学会「ソイルミキシングウォール(SMW)設計施工指針(改訂版)」)

第2章 事例研究

従って、SMWの施工ではくい打機を溝の近傍に位置させて打設が行われる。しかし、後述するがくい打機の自重は365kN(37.25tonf)を有しており、壁面の安定性に影響を与えたことが想像できる。その後の作業プロセスは次の通りであった。

午前10:00頃、深さ40から50cm程度を溝掘削したところ、一辺約30cmの四角形の板状の障害物を発見した。作業員はこれをバックホウで撤去しようとしたところ、その隣に埋設された水道管を誤って破損し、出水させた。これに伴って、この溝は大量に湛水する事態となった。

午前10:30頃、水道局の担当者が現場に到着して止水作業が行われた。出水から止水までの間においては、排水ポンプを作動させて水を外部に排水し、湛水量を極力減少させる対策が講じられた。後述するくい打機の転倒はこの溝近傍の位置で発生しており、水による地盤の軟化も不安定要因となった可能性がある。

午前11:40頃、止水作業が終了し、パイプからの出水は停止した。その後、溝掘削を再開した。

午後0:15頃、溝掘削、及び敷鉄板の敷設の作業を終了した。なお、この敷鉄板とはくい打機の設置に際して、载荷圧力を分散させて沈下を防止するために、地盤表面に敷設したものであった。

午後1:00、くい打機の移動を開始した。

午後1:10頃に前述した溝掘削近傍の施工位置に到着した。この時、敷鉄板に沈下が生じ、機体はゆっくりと傾斜した。図2-1-2はこの時の回避動作から転倒までの様子を概念的に示す。機体傾斜の発生を察知した運転士は図に示すように溝近傍から機体を後退させるとともに、上部を右旋回させて転倒モーメントを減少させている。しかし、機体の傾斜は収まらずむしろ増加し、最終的に転倒に至った。この転倒に際して、機体に搭載されていたコンプレッサーが現場作業員と警備員に激突し、両員とも骨折の重傷を負った。

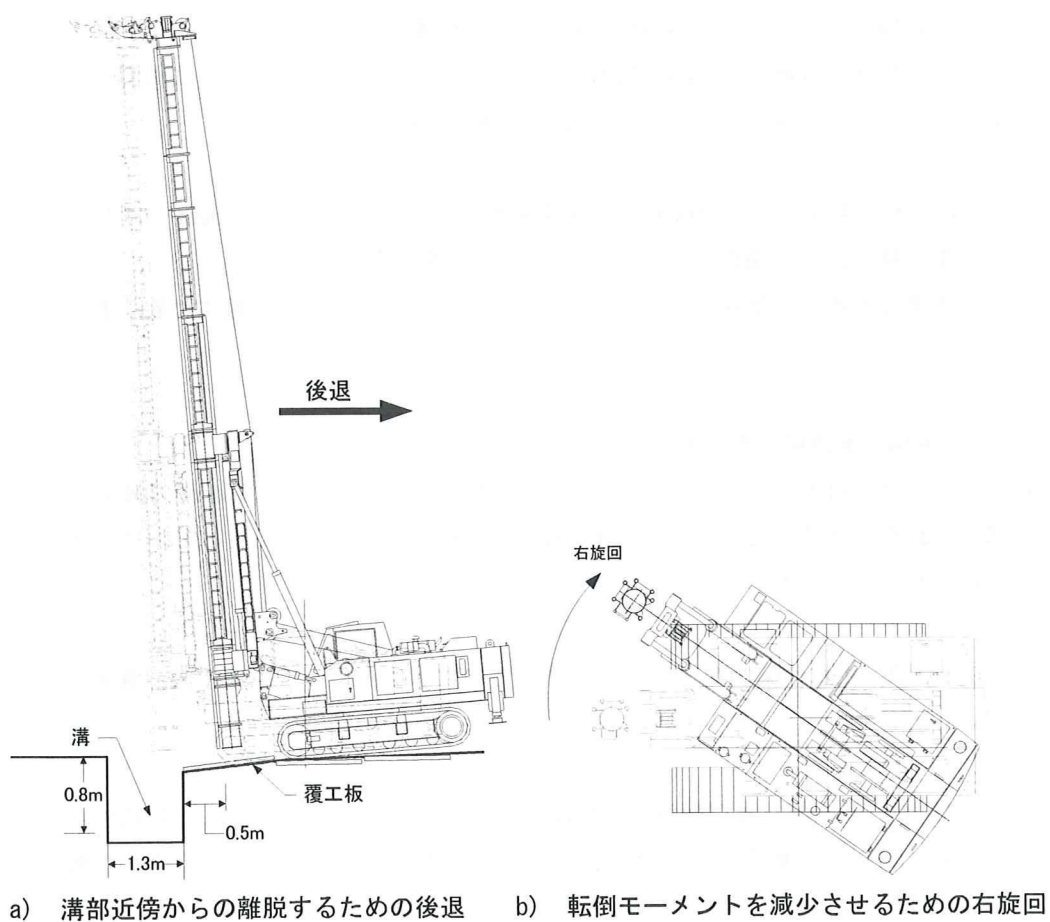


図 2-1-2 転倒直前の回避動作状況

2.1.3 施工上の問題点

(1) 機械と溝の離隔不足

くい打機が転倒に至る直前の位置と掘削溝の関係を図 2-1-3 に示す。図の a) に示すくい打機の位置関係よりクローラ先端と溝壁部との距離は 1.2m であったことがわかる。同図の b) に示す斜面の崩壊状況より、その発生位置はクローラの前方向約 1/4 の部分を占めていた。図面より概算した崩壊の奥行きは約 2.0m である。この掘削溝は上部 1.0m、深さは 0.8m であった。

日本材料学会「SMW 設計施工指針」では、溝幅は上部 1.0m、底部 0.7m、溝深さは 0.6m を施工の標準値として示している。当該現場に設けられた掘削溝の深さはこの標準値に比べて 0.2m 大きかった。

これに加えて同指針では、溝壁面とクローラ端の間の離隔について、法先から地表に向かって 45° の角度で延長して得られる掘削影響線から、さらに 0.2m 以上の離隔を与えて設置するように指示している。従って、必要離隔は掘削深さと 0.2m の和であり、本施工では必要な離隔は 1.0m となる。しかし、今回の事故発生時には寄り付き寸法が 0.9m であり、値は基準よりも小さかった。

(2) 設置地盤の支持力不足

地表面には敷鉄板が壁面部から重複させるように敷設されていたが、写真 2-1-1 より明らかのように敷鉄板は大きく折れ曲がり、履帯には明らかな沈下が見られた。従って、支持地盤の強度が不足したことによって、沈下は生じたことがわかる。くい打機は図 2-1-4 に示すように敷地の境界近くに位置していた。この部分の表層は施されたセメント安定処理が不均一であり、その改良効果は機械を支持するには不十分なものであったと考えられる。事故後に検証された地盤支持力の調査結果は高く推定されているものの、転倒時における実際の地盤支持力は接地圧力以下であったことが沈下の発生からも明らかであった。

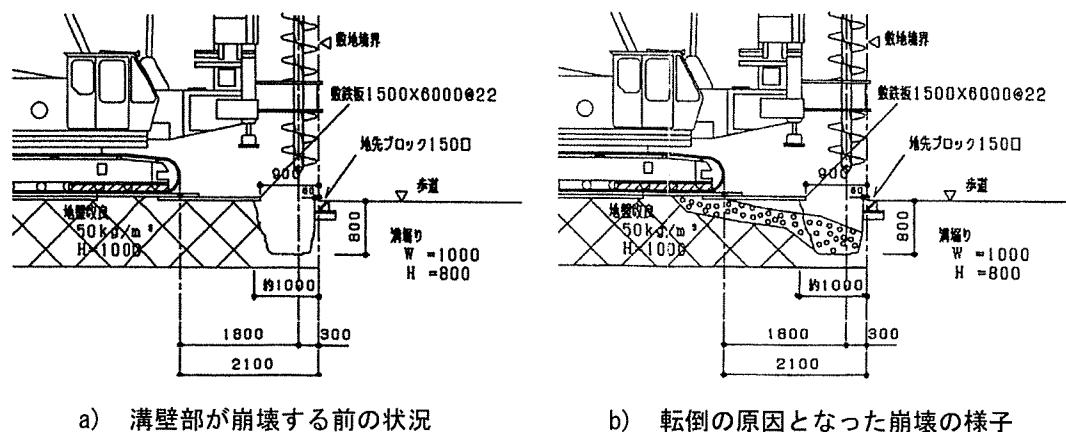


図 2-1-3 くい打機が転倒に至る経過

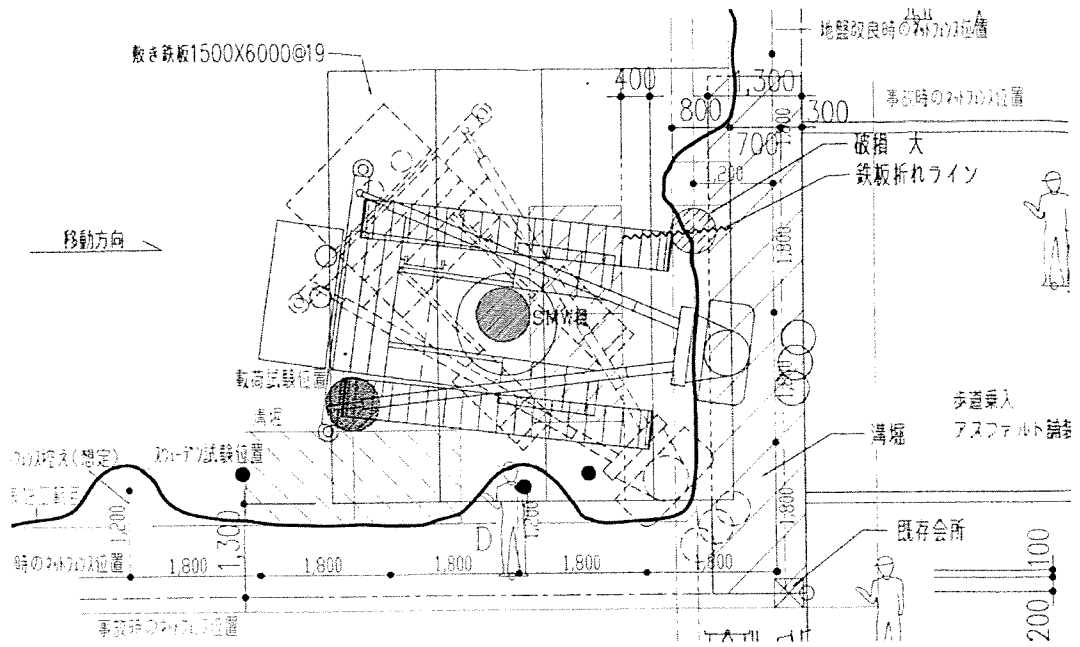


図 2-1-4 敷地境界とくい打機の離隔

2.1.4 くい打機の安定条件

(1) 安定度の確認

厚生労働省令車両系建設機械構造規格²⁾の第3条では、くい打機は前後および左右方向に対して5度以上の安定度(θ_s)を有しなければならないことを述べている。ここで、安定度とは、機械が安定に対して最も不利となる状態において、傾けても転倒しない角度を表わし、前後左右について満足しなければならない値である。

表 2-1-2 にくい打機の諸元を示し、これに基づいて計算した機体の前方と側方の安定度を表 2-1-3 に示す。機体前方に対する安定度は18.4度であり、側方の安定度は11.9度であった。従って、本くい打機の安定度は規則で定める値よりも大きく、安定な条件であった。

表 2-1-2 くい打機の諸元

水平方向の重心位置 (G_x)	0.62m
鉛直方向の重心位置 (G_y)	3.36m
履帯の接地面の長さ (d)	3.475m
左右の履帯の中心間隔 (S)	2.660m

表 2-1-3 機体の安定度

	前方安定度	側方安定度
関係式	$\tan \theta_f = \frac{L-2G_x}{2G_y}$	$\tan \theta_{ss} = \frac{S-2G_x}{2G_y}$
安定度	$\theta_{sf}=18.4 \text{ 度} > 5 \text{ 度}$	$\theta_{ss}=11.9 \text{ 度} > 5 \text{ 度}$

(2) 履帯面に働く接地圧力

履帯面に働く接地圧力は支持地盤が剛体であることを仮定して求めることが可能であり、その計算方法が JIS A 8509-1:2007 「基礎工事機械—安全—第一部：くい打ち機の要求事項」³⁾に示されている。また、(社)日本建設機械化協会の「移動式クレーン、くい打機等の支持地盤養生マニュアル」⁴⁾は旋回角度を考慮した接地圧力分布の具体的な計算方法を解説している。

これを用い計算した結果、本事例の場合では旋回角度(θ)=45度の場合が $\theta=0$ の場合よりも大きくなった。そして、機械の履帯面上に生じた接地圧力の値は146(kPa)から165(kPa)程度であったと推定された。

なお、ここで用いた計算式は地盤を剛体と仮定して導かれたものである。そのため、接地圧力により生じた沈下が引き起こす機体傾斜と、さらにこれに伴って接地圧力が増加する相互作用は考慮されていない。従って、得られた計算値は接地圧力を小さく、すなわち危険側に評価している可能性がある。

2.1.5 現場地耐力の推定

施工現場は深さ約 0.7m 以深の土質が粘土であり、 q_u の値が 30kPa 前後の軟弱地盤であった。この粘土地盤に対する履帯の支持力(q_d)は 110kPa 程度と推定され⁵⁾、 $q_d < P_{max}$ の不安定条件であった。地表から深さ約 0.7m の範囲には砂質土が存在した。セメント安定処理は当初、深さ 1m までを計画したが、実際には 0.7m 程度までしか処理されていなかった。処理深さが計画よりも浅くなった原因は粘土とセメントを均一に混合することが困難なためであった。

災害が発生した現場において、スウェーデン式サウンディング試験⁶⁾が図 2-1-5 に示す位置において実施された。試験は転倒位置の近傍 2 地点(SWS_1 と SWS_2 の地点)と、そこから約 8m 離れた地点(SWS_3 の地点)と 10m 離れた地点(SWS_4 の地点)の計 4 地点である。試験結果に基づいて、機械が設置された地盤の支持力条件を考察する。

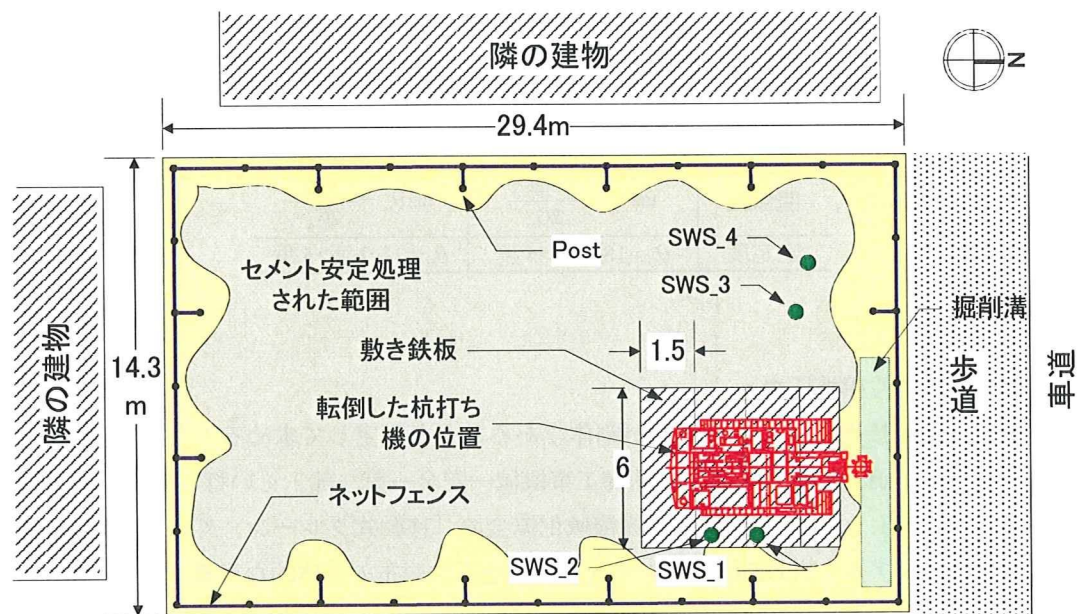


図 2-1-5 災害発生現場の平面状況と地盤調査の実施地点

図 2-1-6 はこの試験結果に基づいて計算した一軸圧縮強さ(q_u)の分布を示す⁶⁾。安定処理が施された浅層部すなわち、地表から深さ 0.75m の q_u は 0.7m 以深のそれに比べて大きな増加が見られる。しかしながら、浅層部の q_u には調査地点の違いによって大きな差が見られる。

転倒付近の SWS_1 および SWS_2 による q_u は、SWS_3 および SWS_4 のそれに比べ小さく、重機を支持できない強さであった。これはセメント安定処理の深さが予定よりも浅くまた、敷地境界部は囲いフェンスが障害となって不十分な処理状態であったためである。転倒はこの境界付近で発生しており、安定処理における施工上の問題も明らかになった。

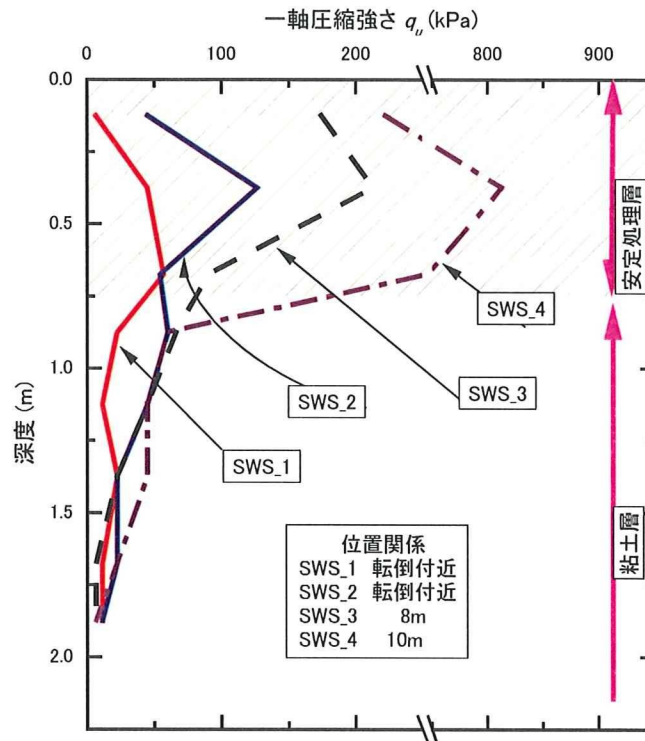


図 2-1-6 スウェーデン式サウンディング試験の結果より算出した一軸圧縮強さ (q_u) 分布